



تأثير متغيرات التعتيق الاصطناعي على مقاومة الشد والبنية المجهرية لسبيكة الألمنيوم 7075 Effect of Artificial Aging Parameters on Tensile Strength and Microstructure of 7075 Aluminum Alloy

محمد يحيى النيفاوي^{1*}، محمود الأسعد¹

Mohamad Yahya Nefawy^{1*}, Mahmoud Al Asad¹

¹قسم هندسة التصميم والإنتاج، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة البعث، حمص، سوريا

¹Department of Design and Production Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Al-Baath University, Hims, Syria

تاريخ النشر: 2020/12/01

تاريخ القبول: 2020/10/15

تاريخ الإستلام: 2020/03/08

المستخلص: قمنا في هذا البحث بدراسة تأثير تغير زمن ودرجة حرارة التعتيق الاصطناعي على مقاومة الشد والبنية المجهرية لسبيكة الألمنيوم 7075، حيث عولجت عينات من سبيكة الألمنيوم 7075 بالتعتيق الاصطناعي في درجات حرارة مختلفة هي 120°C، 160°C، 200°C، لأزمنة هي 0.5، 1.5، 3، 18، 48 ساعة. عندما تم تعتيق سبيكة الألمنيوم 7075 اصطناعياً في درجتي الحرارة 120°C و 160°C كانت قيم مقاومة الشد الاعظمية للسبيكة أعلى منها عند التعتيق في درجة الحرارة 200°C. ازدادت قيم مقاومة الشد لسبيكة الألمنيوم 7075 بزيادة زمن التعتيق الاصطناعي عند التعتيق في درجتي الحرارة 120°C و 160°C، بينما انخفضت قيم مقاومة الشد بزيادة زمن التعتيق عند التعتيق في درجة الحرارة 200°C، وهذا عائد للتغيرات الحاصلة في البنية المجهرية والحجم الحبيبي والأطوار المترسبة كالطور MgZn2. **الكلمات المفتاحية:** سبائك Al-Zn-Mg-Cu، سبيكة الألمنيوم 7075، التعتيق الاصطناعي، خواص الشد، البنية المجهرية.

Abstract: In this research, we studied the effect of change in artificial aging time and temperature on tensile strength and Microstructure for 7075 aluminum alloy, where samples of aluminum alloy 7075 were treated with arti-facial aging at different temperatures are 120 ° C, 160 ° C and 200 ° C for 0.5, 1.5, 3, 18, 48 hours. When the 7075-aluminum alloy was artificially aged in of 120 ° C and 160 ° C, the values of ultimate tensile strength (UTS) of the alloy were higher than when it was aged in 200 ° C. By increasing of artificial aging time, the UTS of 7075 aluminum alloy increased, when the aging temperature was 120 ° C or 160 ° C, while the UTS decreased when the aging temperature was 200 ° C. This is due to changes in the microstructure, grain size, and precipitating phases such as MgZn2.

Keywords: Al-Zn-Mg-Cu Alloys, 7075 Aluminum Alloy, Artificial Aging, Tensile Properties, Microstructure.

المقدمة:

يتمتع معدن الألمنيوم بخواص مميزة أهمها خفة الوزن، إلا أنه معدن ذو قساوة منخفضة لا تتعدى HB 40 ومقاومته على الشد لا تزيد عن 90 N/mm² ولهذا فإن معظم التطبيقات والمجالات التي نستخدم فيها الألمنيوم يكون في صورة سبائكية بإضافة عناصر سبائكية للألمنيوم، وإن العناصر السبائكية الأساسية التي تضاف للألمنيوم هي: النحاس Cu،

*يميل الباحث الرئيسي: yahya.nefawy@gmail.com

والمغنيزيوم Mg ، والمنغنيز Mn ، والسيلكون Si ، والزنك Zn، ونحصل بإضافة هذه العناصر للألمنيوم على سبائك الألمنيوم الأساسية (TapanyUdomphol, 2007)، تعتبر سبائك السلسلة xxx7 من أهم سبائك الألمنيوم وهي السبائك الحاوية على عنصر الزنك كعنصر رئيسي إضافة للمغنيزيوم والنحاس (Al-Zn-Mg-Cu) حيث تؤدي إضافة هذه العناصر لخواص جيدة لهذه السبائك.

إن لسبائك السلسلة xxx7 خواص مميزة ومناسبة لعدد كبير من التطبيقات وبشكل خاص تطبيقات الصناعات الجوية والفضائية، حيث تتمتع سبائك

السلسلة xxx7 بعد تطبيق المعالجات الحرارية عليها بمقاومة شد عالية مع خفة الوزن، وقابلية تشكيل ممتازة، ومقاومة تآكل مقبولة.

ومن أجل تحسين الخواص الميكانيكية عادةً ما تُعرض سبائك الألمنيوم القابلة للمعالجة الحرارية لمعالجات التعتيق، حيث يبدأ التعتيق من المعالجة المحلولية Solution Treatment عند درجات حرارة عالية لضمان انحلال جميع العناصر في طور الألمنيوم الأساس ومن ثم التبريد المفاجئ إلى درجة حرارة الغرفة (سقاية) للوصول إلى المحلول الصلب المشبع Super Saturated Solid (SSS) حيث تتشكل العناصر المترسبة لاحقاً أثناء المعالجة الحرارية بالتعتيق.

يبدأ التعتيق في سبائك الألمنيوم بتشكيل مناطق Guinier – Preston (GP) التي تكون عبارة عن محاليل غنية بالذرات المنحلة تنتشر بشكل عقد متماسكة التي تقوم بفعل تشوه في البنية البلورية، هذه العقد تقوم بمقاومة حركة الانخلاعات ما يؤدي إلى زيادة متانة المعدن، فعلى سبيل المثال تزداد متانة سبائك السلسلة xxx7 بسبب ترسب الطور η $MgZn_2$ بشكل عناقيد والتي تشكل طور ثاني η ضمن محلول الألمنيوم الأساس (Derek Hull, D. J. Bacon, 2011).

درس الباحثون تأثير شروط المعالجات الحرارية على خواص سبائك الألمنيوم عالية المقاومة xxx7 حيث درس الباحث Rout, Prasanta Kumar وزملاؤه تغير خواص السبيكة 7017 بتغير حالات التعتيق T4 تحت التعتيق، T6 التعتيق الأفضل، T7 التعتيق المفرط، التعتيق الزائد في الإفراط (Rout, Microstructural, mechanical and) (electrochemical behaviour of a 7017 Al-Zn-Mg alloy of different tempers, 2015).

وقد درس الباحث Cheng Cao وزملاؤه تأثير التعتيق المسبق على قساوة السبيكة ذات التركيب (2% Mg-5.2% Al-Zn) والمحتوية على 0.45% نحاس، حيث أدى التعتيق المسبق لكثافة أكثر للطور $T-Mg_{32}(Al, Zn)_{49}$ ونعومة حيبياته بحيث تحول من الشكل الشبيه بالشرايح الخشنة إلى شكل أنعم، كما أدى لاضمحلال الطور $S-Al_{2}MgCu$ الشبيه بالإبر ما سبب في ازدياد قيم القساوة بمعدل 34.4% (Cheng Cao, Di Zhang, Linzhong % 34.4) (Cheng Cao, et al., 2016) (Zhuang, & Jishan Zhang, 2017). أما الباحث CHEN Song وزملاؤه فقاموا بدراسة التعتيق ثنائي وثلاثي المراحل للسبيكة 7085، وقد تبين أنه بزيادة زمن مرحلة التعتيق الثانية في التعتيق ثنائي المراحل تزداد مقاومة السبيكة على الشد ثم تتناقص بازدياد الزمن عن حد معين، في حين تستمر مقاومة التشقق بالتآكل الإجهادي Stress Corrosion Cracking (SCC) بالازدياد. أما التعتيق ثلاثي المراحل فقد زاد من مقاومة الشد بمقدار 5% عن التعتيق الثنائي مع تحسين في مقاومة SCC (CHEN Song-yi, et al., 2016).

في حين اهتم الباحث A, Isadare D وزملاؤه بدراسة تأثير معدل التبريد بعد السباكة على خواص السبيكة ذات التركيب (A, Isadare D, et al., 2015) $(Al-5.4Zn-1.43Cu-2.45Mg)$ وكذلك درس الباحث Li, Hong ying وزملاؤه التحكم بعمليات التبريد وتأثيرها على ترسيب الأطوار في السبيكة 7050 (LI, Hongying, LIU, Jiao jiao, YU, Wei chen, ZHAO,) (Hui, & LI, De wang, 2016).

منهجية البحث:

نهدف في هذا البحث إلى دراسة تأثير متغيرات التعتيق الاصطناعي (الزمن ودرجة الحرارة) على خواص سبيكة الألمنيوم 7075 كمقاومة الشد وقساوة فيكرز والبنية المجهرية والأطوار المتشكلة فيها، لذلك تم تعتيق عينات من سبيكة الألمنيوم 7075 اصطناعياً في درجات حرارة مختلفة هي 120°C , 200°C , 160°C ، لأزمنة هي 0.5, 1.5, 3, 18, 48 ساعة.

كانت سبيكة الألمنيوم 7075 المستخدمة في البحث على شكل بيليت بسماكة 4.5 Cm، وبين الجدول (1) التركيب الكيميائي لسبيكة ألمنيوم-زنك-مغنيزيوم-نحاس 7075 ويظهر فيه التركيب القياسي للسبيكة 7075 وفق توصيف جمعية الألمنيوم (Totten & MacKenzie, 2003). والتركيب التجريبي لهذه السبيكة بعد تحليلها باستخدام جهاز التحليل الطيفي Spectrometer.

جدول (1) النسب الوزنية للعناصر في السبيكة 7075 (% wt)

العنصر	التركيب القياسي	التركيب التجريبي
السيليسيوم Si	< 0.4	0.085
التيتانيوم Ti	< 0.2	0.05
الكروم Cr	0.18-0.28	0.18
الحديد Fe	< 0.5	0.17
النحاس Cu	1.2-2	1.8
المغنيزيوم Mg	2.1-2.9	2.35
المنغنيز Mn	< 0.3	0.01
الزنك Zn	5.1-6.1	5.8
الألمنيوم Al	Bal.	Bal.

أُستخدم الفرن الكهربائي المبين في الشكل (1) لتطبيق المعالجات الحرارية، حيث تم تطبيق المعالجة الحرارية المحلولية في درجة الحرارة 500°C لمدة ساعتين، ثم تمت سقاية العينات بماء في درجة حرارة الغرفة، ثم تم تطبيق

معالجات التعتيق الاصطناعي في درجات مختلفة هي 120°C , 200°C , 160°C ، لأزمنة هي 0.5, 1.5, 3, 18, 48 ساعة، حيث ينصح بأن تتم معالجات التعتيق الاصطناعي لسبائك الألمنيوم - زنك (xxx7) في درجات حرارة واقعة بين 100°C و 200°C لأزمنة من ساعتين وحتى 48 ساعة (Totten & MacKenzie, 2003)



شكل (1) الفرن الكهربائي المستخدم في المعالجات الحرارية

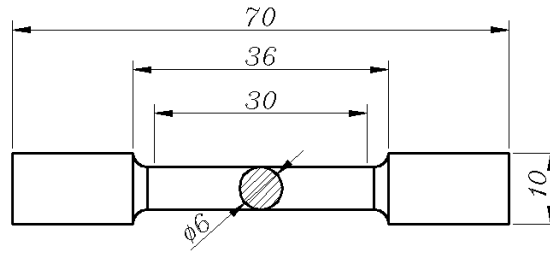
النتائج والمناقشة:

اختبار الشد:

تم إجراء اختبار الشد وفق المواصفة ASTM-B557 بسرعة 25 mm/min عن طريق جهاز الاختبار TINIUS OLSEN H25KS المبين في الشكل (2)، ويظهر في الشكل (3) أبعاد عينة الشد المختبرة.



الشكل (2) جهاز اختبار الشد المستخدم



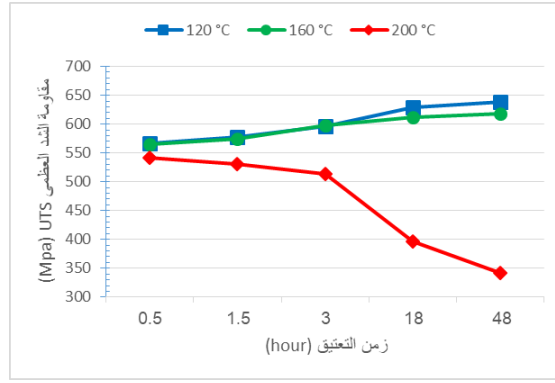
الشكل (3) أبعاد عينة الشد بـ mm

وبين الجدول (2) قيم مقاومة الشد الأعظمية UTS للعينات المعرضة للتعتيق في درجات حرارة وأزمنة مختلفة

جدول (2) قيم مقاومة الشد الأعظمية [Mpa] UTS

درجة حرارة التعتيق	Zمن التعتيق hour				
	0.5	1.5	3	18	48
120 °C	566	578	597	629	639
160 °C	565	575	598	612	618
200 °C	541	530	514	396	342

يمكن أن نرسم منحنيات تغير قيم مقاومة الشد بتغير درجة حرارة وزمن التعتيق ويمكن أن نلاحظ من الشكل (4) ان مقاومة الشد للسبيكة ازدادت عند تزايد زمن التعتيق عند درجتي الحرارة 120 °C و 160 °C، وقد وصلت لقيمها الأعظمية عند زمن تعتيق 48 ساعة، في حين تناقصت مقاومة الشد عند التعتيق في درجة الحرارة 200 °C عند تزايد زمن التعتيق عن 0.5 ساعة.



الشكل (4) تغير مقاومة الشد العظمى UTS لسبيكة الألمنيوم 7075 بتغير درجة حرارة وزمن التعتيق الاصطناعي

كما يمكن ملاحظة أنه عند التعتيق في درجة الحرارة 120°C و 160°C كانت قيم مقاومة الشد قريبة جداً من أجل زمني التعتيق 18 ساعة و 48 ساعة وهي على التوالي 629 Mpa و 639 Mpa من أجل التعتيق في درجة الحرارة 120°C و 612 Mpa و 618 Mpa من أجل التعتيق في درجة الحرارة 160°C ، وبالتالي يكون من المتوقع إلتداد مقاومة الشد للسبيكة مع زيادة زمن التعتيق لأكثر من 48 ساعة، بل على العكس حيث ستبدأ مقاومة الشد للسبيكة بالانخفاض وذلك بفعل الإفراط الزائد في التعتيق، وهذا واضح في المرجع (Rout, Ghosh, & Ghosh, Microstructural, mechanical and electrochemical behavior of a 7017 Al-Zn-Mg alloy of different tempers, 2015)، حيث تراجمت الخواص الميكانيكية للسبيكة 7017 عند زيادة زمن التعتيق عن 50 ساعة.

كما تجدر الإشارة هنا أنه للحصول على القيمة الأعظمية لمقاومة الشد لسبيكة الألمنيوم 7075 والتي بلغت 639 Mpa يتوجب معالجتها حرارياً بالتعتيق الاصطناعي في درجة الحرارة 120°C لمدة 48 ساعة وهذا ما يؤدي بطبيعة الحال لتكاليف إضافية بنتيجة زيادة مدة تشغيل الفرن الكهربائي واستجراره للطاقة الكهربائية.

يمكن أن نقارن قيمة مقاومة الشد الأعظمية لسبيكة الألمنيوم 7075 والتي حصلنا عليها بعد التعتيق الاصطناعي في درجة الحرارة 120°C لمدة 48 ساعة مع قيم مقاومة الشد التي حصل عليها مختلف الباحثين على سبائك مختلفة وبمعالجات حرارية كما يوضح الجدول (3). ويمكن أن نلاحظ تفوق سبيكة الألمنيوم 7075 من ناحية مقاومة الشد بعد معالجتها كما ذكر، على باقي السبائك المذكورة في الجدول (3).

جدول (3) مقارنة مع نتائج دراسات سابقة

مقاومة الشد الأعظمية	طريقة المعالجة	السبيكة	الباحث
457 Mpa	T6 (120°C/24 h)	7017	Prasanta Kumar
570 Mpa	تعتيق ثلاثي المراحل	7085	Chen Song
298 Mpa	T6 (140°C/5 h)	7475	Isadare
565 Mpa	T6 (120°C/24 h)	7050	Hong ying
639 Mpa	T6 (120°C/48 h)	7075	بحثنا الحالي

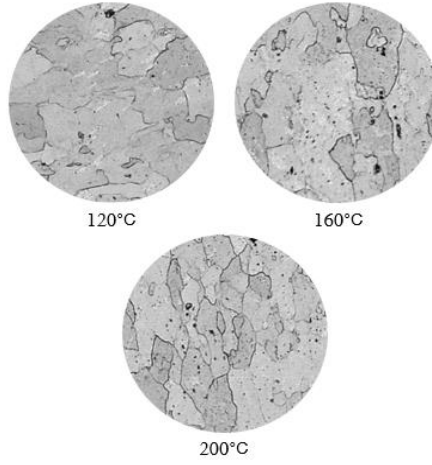
فحص البنية المجهرية:

للحصول على الصور المجهرية وفق المواصفة ASTM-E3 تم استخدام المجهر الضوئي B-353 Met Optika وبمقدار تكبير X200، وكمرحلة أولى فقد، تمت عملية الشد باستخدام جهاز الشد نصف الآلي وأوراق الشد المائي المؤلفة من حبيبات من كربيد السيليكون ذات الدرجات وفق التسلسل 600، 800، 1000، 1200 وقد تم التبريد بتمرير تيار مائي أثناء الشد تجنباً لأي تغيرات في البنية بسبب الحرارة الناتجة.

وللحصول على سطح مصقول بدون خدوش للعينة تم استخدام معجون الماسي للصقل بقياس 0.25 μm.

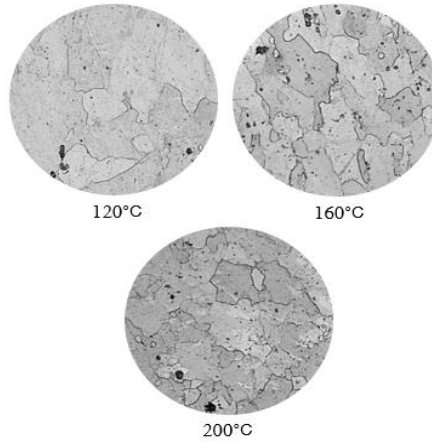
تمت عملية التخريش بغمس السطح لمدة 8 ثوان في محلول الإظهار Keller's Reagent وهو ذو التركيب التالي (William F. Gale, Terry C. Totemeier, 2004):

$1.5 \text{ Cm}^3 \text{ HF}$, $1.5 \text{ Cm}^3 \text{ HCL}$, $2.5 \text{ Cm}^3 \text{ HNO}_3$, $95 \text{ Cm}^3 \text{ H}_2\text{O}$

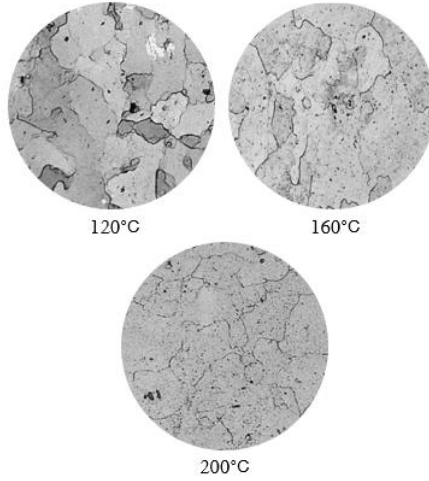


الشكل (5) الصور المجهرية بتكبير 200X للسبيكة 7075 المعالجة بالتعتيق الاصطناعي في درجات حرارة مختلفة لمدة 0.5 ساعة

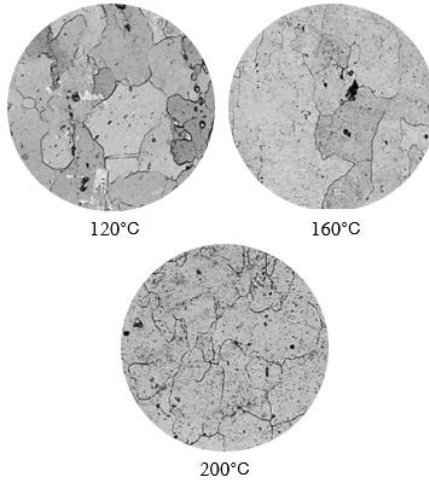
تبين الأشكال (5) (6) (7) (8) (9) الصور المجهرية الضوئية للعينات المعالجة بالتعتيق الاصطناعي في درجات الحرارة 120°C , 160°C , 200°C ، لأزمنة هي 0.5, 1.5, 3, 18, 48 ساعة.



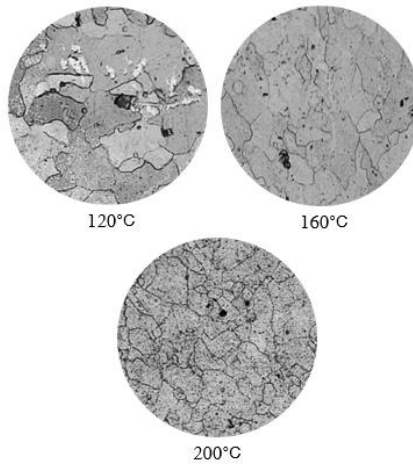
الشكل (6) الصور المجهرية بتكبير 200X للسبيكة 7075 المعالجة بالتعتيق الاصطناعي في درجات حرارة مختلفة لمدة 1.5 ساعة



الشكل (7) الصور المجهرية بتكبير 200X للسبيكة 7075 المعالجة بالتعتيق الاصطناعي في درجات حرارة مختلفة لمدة 3 ساعات



الشكل (8) الصور المجهرية بتكبير 200X للسبيكة 7075 المعالجة بالتعتيق الاصطناعي في درجات حرارة مختلفة لمدة 18 ساعة



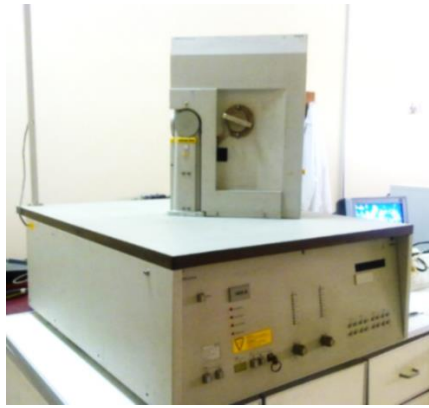
الشكل (9) الصور المجهرية بتكبير 200X للسبيكة 7075 المعالجة بالتعتيق الاصطناعي في درجات حرارة مختلفة لمدة 48 ساعة

تعطي صور المجهر الضوئي نظرة عامة حول البنية المجهرية، وتدلل جميع هذه الصور المجهرية على تغير حجم حبيبات البنية مع زيادة درجة حرارة التعتيق، كما اختلفت أحجام الحبيبات باختلاف أزمنة التعتيق حيث ازداد ظهور الحبيبات تدريجياً بزيادة أزمنة التعتيق، وإن ازداد ظهور الحبيبات (زيادة نعومة الحبيبات) يؤدي لتحسين الخواص الميكانيكية للسبائك أما خشونة الحبيبات فتؤدي لضعف في الخواص الميكانيكية.

لم يتم تحليل البنية باستخدام المجهر الإلكتروني الماسح TEM ومن الممكن العودة للمرجع (Ma K, et al., 2014) للاطلاع على صور TEM للأطوار المتشكلة.

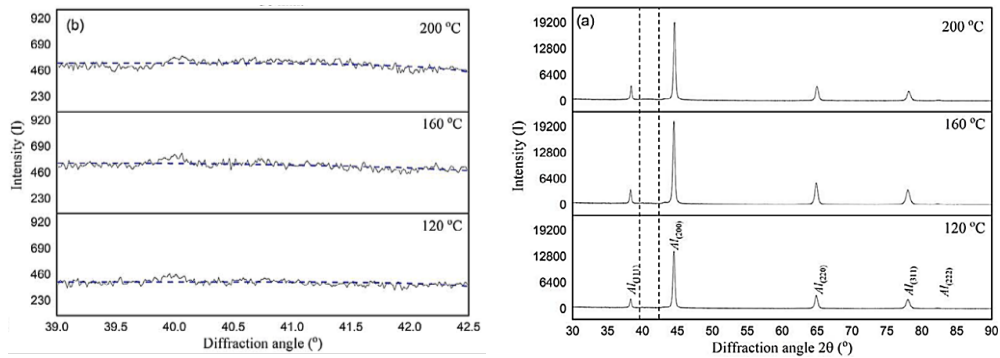
تحليل انعراج الأشعة السينية XRD

تتغير خواص المادة بالاعتماد على البنية المجهرية الميكروية والأطوار، حيث تحدد هذه الأطوار الخصائص المميزة للمواد مثل المطيلية وسلوك المادة عند الانهيار. وعند تعرض المادة لأي تشوه ستغير البنية المجهرية وبالتالي سيتغير طيف حيود الأشعة السينية.

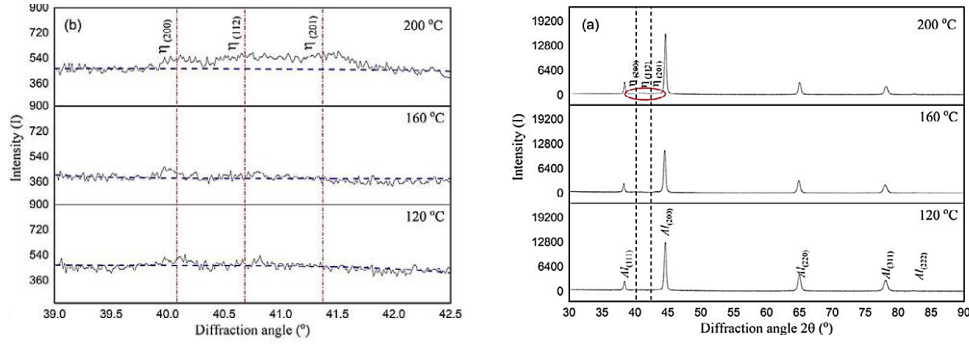


الشكل (10) جهاز اختبار انعراج الأشعة السينية XRD

تم إجراء اختبارات حيود الأشعة السينية على العينات بهدف تفسير التغير في الخواص الميكانيكية حيث تم استخدام جهاز من نوع Philips طراز PW 1830 المبين في الشكل (10)، وقد تم المسح ضمن مجال الزاوية 30° حتى 90°. تتألف بنية السبيكة 7075 المعرضة للتعتيق الاصطناعي بشكل أساسي من الطورين Al و MgZn₂ كما هو مذكور في المرجعين (Pastor A & Svoboda HG, 2013) (Oskouei RH, Barati MR, & Ibrahim RN, 2016).



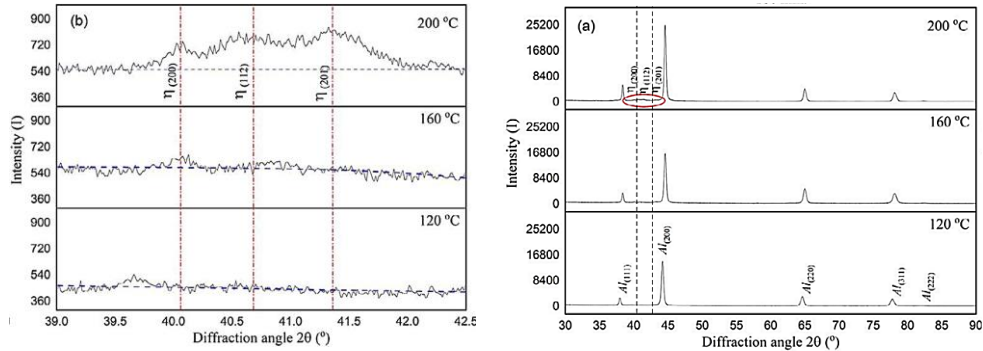
الشكل (11) : طيف انعراج الأشعة السينية لسبيكة الألمنيوم 7075 عند تعتيقها اصطناعياً لمدة 0.5 hour في درجات الحرارة المختلفة.



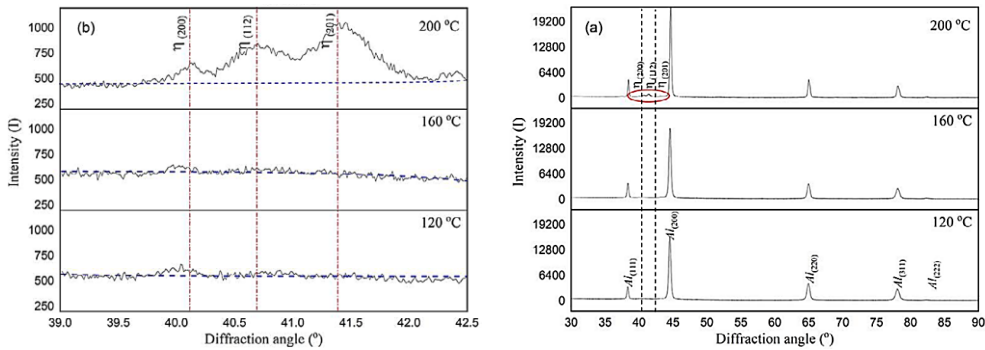
الشكل (12) : طيف انعراج الأشعة السينية لسبيكة الألمنيوم 7075 عند تعتيقها اصطناعياً لمدة 1.5 hour في درجات الحرارة المختلفة.

يظهر في الأشكال (11) (12) (13) (14) (15) طيف انعراج الأشعة السينية XRD لعينات من سبيكة الألمنيوم 7075 المعالجة بالتعتيق الاصطناعي في درجات الحرارة 120°C، 160°C، 200°C، لآزمنة هي 0.5، 1.5، 3، 18، 48 ساعة، حيث نعين طيف انعراج الأشعة السينية بشكل كامل في الأشكال ذات الرمز a، في حين أن الأشكال ذات الرمز b هي تكبير للطيف الواقع بين الخطين المنقطين.

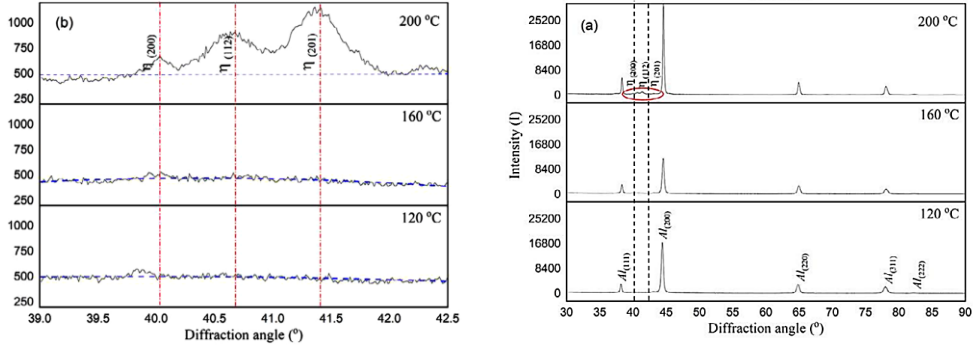
لم نلاحظ في الشكل (11) ظهور الطور MgZn₂ عند التعتيق لمدة 0.5 ساعة ولجميع درجات الحرارة 120°C، 160°C، 200°C بسبب أن زمن التعتيق كان قليلاً وغير كاف لتشكيل هذا الطور، وقد بدأ تشكل هذا الطور تدريجياً في حالة زمن تعتيق 1.5 ساعة كما يظهر في الشكل (12)، واستمر هذا الطور بالظهور والزيادة مع زيادة زمن التعتيق وهذا ما يمكن استنتاجه من أشكال طيف انعراج الأشعة السينية (13) (14) (15).



الشكل (13) : طيف انعراج الأشعة السينية لسبيكة الألمنيوم 7075 عند تعتيقها اصطناعياً لمدة 3 hour في درجات الحرارة المختلفة.



الشكل (14) : طيف انعراج الأشعة السينية لسبيكة الألمنيوم 7075 عند تعتيقها اصطناعياً لمدة 18 hour في درجات الحرارة المختلفة.



الشكل (15) : طيف انعراج الأشعة السينية لسبيكة الألمنيوم 7075 عند تعتيقها اصطناعياً لمدة 48 hour في درجات الحرارة المختلفة.

الاستنتاجات:

- تغيرت مقاومة الشد العظمى UTS لسبيكة الألمنيوم 7075 بتغير درجة حرارة وزمن التعتيق الاصطناعي، وبشكل عام كانت قيم مقاومة الشد عند التعتيق الاصطناعي في درجتي الحرارة 120°C و 160°C أعلى منها عند التعتيق في درجة الحرارة 200°C.
- بزيادة زمن التعتيق الاصطناعي ازدادت قيم مقاومة الشد لسبيكة الألمنيوم 7075، ذلك عند التعتيق في درجتي الحرارة 120°C و 160°C حيث بلغت قيمها عند التعتيق لمدة 48 ساعة في درجتي الحرارة 120°C و 160°C على التوالي 639 Mpa و 618 Mpa.
- بزيادة زمن التعتيق الاصطناعي انخفضت قيم مقاومة الشد لسبيكة الألمنيوم 7075 عند التعتيق في درجة الحرارة 200°C وبلغت قيمة 342 Mpa عند التعتيق لمدة 48 ساعة في درجة الحرارة 200°C.
- تغير حجم حبيبات البنية المجهرية لسبيكة الألمنيوم 7075 مع زيادة درجة حرارة التعتيق، كما اختلفت أحجام الحبيبات باختلاف أزمنة التعتيق حيث ازداد ظهور الحبيبات تدريجياً بزيادة أزمنة التعتيق.
- لم يظهر الطور MgZn₂ عند التعتيق لمدة 0.5 ساعة من أجل جميع درجات الحرارة 120°C، 160°C، 200°C، بسبب أن زمن التعتيق كان قليلاً وغير كاف لتشكيل هذا الطور، وقد بدأ تشكل هذا الطور تدريجياً من أجل زمن تعتيق 1.5 ساعة واستمر هذا الطور بالظهور والزيادة مع زيادة زمن التعتيق وهذا ما وضحته دراسة انعراج الأشعة السينية XRD لسبيكة الألمنيوم 7075.

قائمة المصادر والمراجع:

- Isadare A, D, O, Adeoye M, R, Adetunji A, M, Oluwasegun K, L, Rominiyi A, & J, Akinluwade K. (2015). Effect of As-Cast Cooling on the Microstructure and Mechanical Properties of Age-Hardened 7000 Series Aluminium Alloy. *International Journal of Materials Engineering*.
- CHEN Song-yi, CHEN Kang-hua, DONG Peng-xuan, YE Sheng-ping, HUANG Lan-ping, & YANG Dai-jun. (2016). Effect of a novel three-step aging on strength, stress corrosion cracking and microstructure of AA7085. *J. Cent. South Univ.*(23), p. 1858–1862.
- Cheng Cao, Di Zhang, Linzhong Zhuang, & Jishan Zhang. (2017). Improved age-hardening response and altered precipitation behavior of Al-5.2Mg-0.45Cu-2.0Zn (wt%) alloy with pre-aging treatment. *Journal of Alloys and Compounds*(691), pp. 40-43.
- Cheng Cao, Di Zhang, XuWang, QibiaoMa, Linzhong, Zhuang, & Jishan Zhang. (2016). Effects of Cu addition on the precipitation hardening response and intergranular corrosion of Al-5.2Mg-2.0Zn (wt.%) alloy. *Materials Characterization*(122), pp. 177–182.
- Derek Hull, D. J. Bacon. (2011). *introduction to Dislocations* (5 ed.). Elsevier.
- LI, Hongying, LIU, Jiao jiao, YU, Wei chen, ZHAO, Hui, & LI, De wang. (2016). Microstructure evolution of Al–Zn–Mg–Cu alloy during non-linear cooling process. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*(26).
- Ma K, Wen H, Hu T, Topping TD, Isheim D, & Seidman D. (2014). Mechanical behavior and strengthening mechanisms in ultrafine grain precipitation-strengthened aluminum alloy. *Acta Materialia*.
- Oskouei RH, Barati MR, & Ibrahim RN. (2016). Surface Characterizations of Fretting Fatigue Damage in Aluminum Alloy 7075-T6 Clamped Joints: The Beneficial role of Ni–P Coatings. *Materials (Basel)*.
- Pastor A, & Svoboda HG. (2013). Time-evolution of Heat Affected Zone (HAZ) of Friction Stir Welds of AA7075-T651. *Materials Physics and Chemistry*.
- Rout, P. K. (2015). Microstructural, mechanical and electrochemical behaviour of a 7017 Al-Zn-Mg alloy of different tempers. *Materials Characterization*(104).
- Rout, P. K., Ghosh, M. M., & Ghosh, K. S. (2015). Microstructural, mechanical and electrochemical behavior of a 7017 Al-Zn-Mg alloy of different tempers. *Materials Characterization*.
- TapanyUdomphol. (2007). *Aluminum and its Alloy*. Suranaree University of Technology.
- Totten, G. E., & MacKenzie, D. S. (2003). *Handbook of Aluminum Volume 1 Physical Metallurgy and Processes*. MARCEL DEKKER, INC.
- William F. Gale, Terry C. Totemeier. (2004). *Smithells Metals Reference Book* (8 ed.). Butterworth-Heinemann.